

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до розрахункової роботи
**«Опрацювання результатів випробувань газотурбінних
газоперекачувальних агрегатів»**
з курсу «Змінні режими газотурбінних установок»
для студентів спеціальності
142 Енергетичне машинобудування

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 1 від 19.02.2020 р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2020

Методичні вказівки до розрахункової роботи «Опрацювання результатів випробувань газотурбінних газоперекачувальних агрегатів» з курсу «Змінні режими газотурбінних установок» для студентів спеціальності 142 Енергетичне машинобудування / уклад. О. В. Лапузін, Ю. О. Юдін, В. П. Суботович – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. — 32 с.

Укладачі О. В. Лапузін

Ю. О. Юдін

В. П. Суботович

Рецензент О. І. Тарасов

Кафедра турбінобудування

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень.....	4
1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ.....	6
1.1 Терміни та визначення.....	6
2. РОЗРАХУНКИ ПОКАЗНИКІВ ГАЗОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ.....	7
2.1. Потужність на муфті «ГТУ - нагнітач».....	7
2.2 Механічні втрати.....	7
2.3.Теплові втрати.....	7
2.4. Витрати паливного газу.....	7
2.5. Нижча теплота згоряння паливного газу.....	8
2.6. Ефективний КПД ГТУ.....	8
2.7 Результати випробувань ГТУ.....	8
2.8 Показники ГТУ в умовах ІСО.....	9
3. РОЗРАХУНКИ ПОКАЗНИКІВ ГАЗОВОГО КОМПРЕСОРА.....	10
3.1. Показники процесу стиснення.....	10
3.2. Властивості природних газів.....	13
3.3 Характеристики газового компресора (ВЦН).....	15
Додаток А Характеристика компонентів природного газу.....	17
Додаток Б Функції стиснення на базі зведеного рівняння стану BWR.....	18
Додаток В Стандартні природні газу.....	18
Додаток Г Фізичні константи газу.....	19
Додаток Д Коефіцієнти компонентів природного газу.....	19
Додаток Е Схеми і параметри циклів ГТД.....	20
Додаток Ж Приклад розрахунку ВЦН.....	21
Додаток К Приклад розрахунку ГПА.....	25

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

C_p – питома теплоємність природного газу при постійному тиску, кДж/кг*К;

C_v – питома теплоємність природного газу при постійному об'ємі, кДж/кг*К;

G – масова витрата, кг/с;

i – питома ентальпія, кДж/кг;

H – питома робота, напор, кДж /кг;

ρ – щільність, кг/м³;

d – відносна щільність до повітря;

M – молярна маса, кг/кмоль;

N – потужність, кВт;

n – частота обертання, об/хв;

P – абсолютний тиск, МПа;

Q – об'ємна продуктивність (витрата), м³/хв;

q_n – комерційна продуктивність, 10⁶м³/доба;

Q_n – об'ємна нижча теплота згоряння, кДж/м³;

Q_m – масова нижча теплота згоряння, кДж/кг;

R – газова стала, кДж/кг*к

T – абсолютна температура, к;

t – температура по Цельсію, °С;

x – об'ємна мольна концентрація, %;

X – коефіцієнт ізобаричної стисливості;

Y – коефіцієнт ізотермічної стисливості;

Z – коефіцієнт ізотермічної стисливості;

ε – степінь підвищення тиску;

η – коефіцієнт корисної дії;

π – приведений тиск;

τ – зведена температура.

ІНДЕКСИ ДО ПОЗНАЧЕНЬ

0 – ідеально газовий, номінальний;
1 – перед турбіною ГТУ;
2 – після турбіни ГТУ;
3 – перед компресором ГТУ;
4 – після компресору ГТУ;
 1_H – на вході у нагнітач (ВЦН);
 2_H – на виході з нагнітача;
а – атмосферне повітря;
із – ізотропний;
кр – критичний;
 n – політропний;
т – температурний;
 v – об’ємний;
пр – приведений;
ср – середній;
ном – номінальний;
е – ефективний;
пг – паливний газ;
 i – компонент природнього газу;
К – компресор;
квт – компресор високого тиску;
кнт – компресор низького тиску;
н – нагнітач;
д – звужуючий пристрій (діафрагма);
СТ – силова турбіна.

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Ці методичні вказівки розроблені з метою встановлення правил і методів обробки результатів випробувань (попередніх, приймальних, експлуатаційних та інших видів) газотурбінних газоперекачувальних агрегатів (далі – ГПА) в частині визначення їх вихідних показників (потужності на муфті газотурбінної установки (далі – ГТУ), коефіцієнта корисної дії (далі – ККД) ГТУ, ККД і інших показників газового компресора – відцентрового нагнітача (далі – ВЦН).

Методичні вказівки можуть бути використані при обробці результатів випробувань електроприводних ГПА з ВЦН.

Умовні позначення й індекси параметрів відповідають сформованій вітчизняній та міжнародній практиці.

Фізичні константи індивідуальних газів зведені в таблицю Г.1.

Типова схема вимірювань параметрів при проведенні теплотехнічних і газодинамічних випробувань ГПА зведена на рисунку Е.1.

1.1 Терміни та визначення

1.1.1 Станційні умови (ДЕСТ 28775) – це умови, при яких визначаються параметри номінального режиму ГТУ (ГПА), розраховані для температури і тиску атмосферного повітря відповідно $+15^{\circ}\text{C}$ і $0,1013\text{ МПа}$ з урахуванням гідравлічних опорів вхідного і вихідного трактів при відсутності утилізаційного теплообмінника.

1.1.2 Умови ISO 2314 (ДЕСТ 20440) – це умови, при яких визначається технічний рівень власне ГТУ без урахування опорів вхідного і вихідного трактів:

– параметри повітря на вході (в площині вхідного патрубку компресора):

- повний тиск $0,1013\text{ МПа}$;
- повна температура 15°C ;
- відносна вологість 60% .

– параметри на вихлопі (в площині вихлопного патрубку турбіни або на виході регенератора, якщо використовується регенеративний цикл):

– статичний тиск $0,1013\text{ МПа}$

1.1.3 Номінальна потужність ГТУ (ГПА) в станційних умовах – це потужність на муфті ГТУ в станційних умовах по 1.1.1 (без відборів стисненого повітря на протиобмерзну систему і на зовнішні станційні потреби, з урахуванням гідравлічних опорів вхідного і вихлопного трактів при відсутності утилізаційного теплообмінника)

1.1.4 Номінальний ККД ГТУ в станційних умовах – це ККД, розрахований для умов відповідно до 1.1.1.

1.1.5 Номінальна потужність і ККД ГТУ за умов ISO – потужність і ККД, що визначаються для умов відповідно до 1.1.2.

1.1.6 Номінальний витрата палива ГТУ – витрата палива за умов 1.1.1.

1.1.7 Комерційна продуктивність ВЦН – витрата газу через ВЦН, виражений в $\frac{\text{м}^3}{\text{сут}} \cdot 10^6$ при $T = 293,15 \text{ К}$ та $P = 0,1013 \text{ МПа}$

1.1.8 Об'ємна продуктивність ВЦН – об'ємна витрата газу в перерізі вхідного патрубка ВЦН при вхідних параметрах газу, $\frac{\text{м}^3}{\text{мин}}$

1.1.9 Ступінь підвищення тиску ВЦН – відношення абсолютних тисків, вимірюваних в перерізах вхідного і вихідного патрубків (фланців).

1.1.10 Політропний ККД ВЦН – відношення питомої корисної політропної роботи (політропного напору) до різниці ентальпій (питомій повного напору), що визначаються за параметрами газу, виміряним в перерізах вхідного і вихідного патрубків (фланців).

1.1.11 Зведені параметри – параметри, отримані в процесі випробувань ГПА і перераховані на умови відповідно за 1.1.1 або 1.1.2.

2. РОЗРАХУНКИ ПОКАЗНИКІВ ГАЗОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ

2.1 Потужність на муфті «ГТУ – нагнітач», яка визначається за потужністю компресора (нагнітача), обчислюють відповідно до ДЕСТ 20440 за формулою

$$Ne = N_i + \Delta N_m + N_r, \quad (2.1)$$

де N_i – внутрішня потужність ВЦН, визначають відповідно до підрозділу 3.1.7;

ΔN_m – механічні втрати в ВЦН;

N_r – теплові втрати ВЦН в навколишнє середовище.

2.1.1 При наявності редуктора (мультиплікатора) ефективну потужність визначають на муфті «редуктор (мультиплікатор) – нагнітач», тобто редуктор вважається приналежністю ГТУ.

2.1.2 Допускається розрахувати ефективну потужність ГТУ у такій формі:

$$Ne = \frac{N_i}{\eta_m} \quad (2.2)$$

де η_m – механічний ККД ВЦН, включаючи відносні теплові втрати.

2.2 Механічні втрати включають у себе втрати енергії в підшипниках, насосах та інших пристроях, здатних призвести до втрат (відведення) енергії від ротора ВЦН.

Механічні втрати, звичайно еквівалентні $\eta_m = (0,995 \div 0,985)$, оцінюються розрахунковим шляхом за результатами спеціальних випробувань

2.3 Теплові втрати – N_r оцінюють за формулою

$$N_r = \alpha \cdot F \cdot (T_n - T_a) \cdot 10^{-3}. \quad (2.3)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище: $\alpha = 14 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$;

F – площа поверхні ВЦН;

T_n, T_a – відповідно середні температури корпусу ВЦН і навколишнього повітря.

При натурних випробуваннях на природному газі високого тиску тепловими втратами можна знехтувати.

2.4 Витрату паливного газу визначають відповідно до ДЕСТ 8.563.3. Розрахунок коефіцієнтів стисливості і щільності паливного газу здійснюється за співвідношенням розділу 6.

2.5 Нижчу теплоту згоряння паливного газу обчислюють щодо компонентного складу газу і значення величин теплоти згоряння компонентів, зведених у таблицю А.1:

об’ємна нижча теплота згоряння

$$Q_H = 0,01 \sum_{i=1}^n x_i \cdot Q_{Hi} \quad (2.4)$$

масова нижча теплота згоряння

$$Q_M = \frac{Q_H}{1,2044 \cdot d}, \quad (2.5)$$

$$d = 0,01 \sum_{i=1}^n x_i \cdot d_i \quad (2.6)$$

де d_i – відносна щільність i – компонента, визначають за таблицею А.1.

2.6 Ефективний ККД ГТУ обчислюють за формулою

$$\eta_e = \frac{Ne}{G_{\text{тг}} \cdot (Q_M + i_{\text{т}})}, \quad (2.7)$$

де $G_{\text{т}}$ – витрата паливного газу, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$;

$i_{\text{т}}$ – питома ентальпія паливного газу, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

Значення ентальпії паливного газу може бути визначено за наближеною формулою:

$$i_{\text{тг}} = 2,3(T_{\text{тг}} - 273,15), \quad (2.8)$$

де 2,3 – середня питома теплоємність паливного газу.

У діапазоні температур паливного газу від 5 до 25 °С поправкою - $i_{\text{т}}$

можна знехтувати (з похибкою ККД ГТУ не більше 0,1 % відносних.)

2.7 Результати випробувань ГТУ, виконаних за кінематичною схемою з вільною силовою турбіною, представляють в зведеній формі з використанням методів подібності відповідно до ДЕСТ 20440. Зведені параметри обчислюють за такими формулами

– зведена потужність

$$N_{e_{np}} = N_{e_{np}} \cdot \frac{P_{a_0}}{P_a} \cdot \sqrt{\frac{T_{3_0}}{T_3}}, \quad (2.9)$$

– зведений ККД

$$\eta_{e_{np}} = \eta_e, \quad (2.10)$$

– зведена витрата паливного газу

$$G_{\tau_{np}} = G_{\tau} \cdot \frac{P_{a_0}}{P_a} \cdot \sqrt{\frac{T_{3_0}}{T_3}} \cdot \frac{Q_M}{Q_{M_0}}, \quad (2.11)$$

– зведена частота обертання роторів

$$n_{np} = n \cdot \sqrt{\frac{T_{3_0}}{T_3}}, \quad (2.12)$$

– зведені абсолютні температури по тракту ГТУ

$$T_{np} = T \frac{T_{3_0}}{T_3}, \quad (2.13)$$

– зведена ступінь підвищення тиску в компресорі ГТУ

$$\varepsilon_{\kappa_{np}} = \varepsilon_{\kappa}, \quad (2.14)$$

– зведена витрата циклового повітря

$$G_{3_{np}} = G_3 \cdot \frac{P_{a_0}}{P_a} \cdot \sqrt{\frac{T_3}{T_{3_0}}}. \quad (2.15)$$

2.8 Показники ГТУ в умовах ІСО, тобто без урахування втрат тиску у всмоктувальному і вихлопному трактах, визначають за допомогою розрахункових поправок за формулами наступного типу:

$$N_e^{ico} = \left[1 + 0,01 \cdot (K_3 \bar{\delta P}_3 + K_2 \bar{\delta P}_2) \right] N_{e_{np}} \quad (2.16)$$

де K_2 і K_3 – розрахункові коефіцієнти впливу (узгоджуються програмою-методикою випробувань);

$\bar{\delta P}_2$ і $\bar{\delta P}_3$ – відносні втрати тиску в повітрязбірних і випускних трактах ГТУ (рисунок Е1).

3. РОЗРАХУНКИ ПОКАЗНИКІВ ГАЗОВОГО КОМПРЕСОРА

3.1 Показники процесу стиснення

3.1.1 Основою системи визначень потужності, ефективності та інших показників відцентрових компресорів і їх приводів є термодинамічний аналіз процесу стиснення газу, який передбачає використання різних термодинамічних і калоричних функцій реального газу, перелік і визначення яких наведено в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Термодинамічні та калоричні функції природних газів

Найменування показників	Позначення	Реальний газ	Ідеальний газ
Рівняння стану		$P \cdot V = Z \cdot R \cdot T$	$P \cdot V = R \cdot T$
Коефіцієнт стисливості	Z	Z	1,0
Коефіцієнт ізотермічної стисливості	Y	$-\frac{P}{V} \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T = 1 - \frac{\pi}{Z} \cdot \left(\frac{\partial Z}{\partial \pi} \right)_T$	1,0
Коефіцієнт ізобаричної стисливості	X	$\frac{T}{V} \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P - 1 = \frac{\tau}{Z} \cdot \left(\frac{\partial Z}{\partial \tau} \right)_\pi$	0
Поправка ізохорної теплоємності	$\frac{\Delta C_v}{R}$	$\frac{T}{R} \cdot \int_0^v \left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2} \right)_v \cdot dV$	0
Поправка ізобарної теплоємності	$\frac{\Delta C_p}{R}$	$-\frac{T}{R} \cdot \int_0^p \left(\frac{\partial^2 V}{\partial T^2} \right)_p \cdot dP$	0
Поправка ентальпії	Δi	$T^2 \cdot \int_0^p \left[\frac{\partial \left(\frac{V}{T} \right)}{\partial T} \right] \cdot dT$	0

Зведена поправка ентальпії	$\frac{\Delta i}{RT_{кр}}$	$-\tau^2 \cdot \int_0^\pi \left(\frac{\partial Z}{\partial \pi}\right)_\pi \cdot \frac{d\pi}{\pi}$	0
Ізобарна теплоємність	C_p	$C_{p_0} + \Delta C_p$	C_{p_0}
Ентальпія	i	$i_0 + \Delta i$	i_0
Об'ємний показник ізоентропії	K_v $\frac{K_v - 1}{K_v}$	$-\frac{V}{P} \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_s = Y \frac{C_p}{C_v}$ $\frac{Z \cdot R \cdot (1 + X)^2}{C_p} - (Y - 1)$	$\frac{C_p}{C_v} = K_0$ $\frac{K_0 - 1}{K_0} = \frac{R}{C_{p_0}}$
Температурний показник ізоентропії	K_T $\frac{K_T - 1}{K_T}$	$\left[1 - \frac{P}{T} \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_s\right]^{-1}$ $\frac{Z \cdot R \cdot (1 + X)}{C_p}$	K_0 $\frac{K_0 - 1}{K_0}$
Температурний коефіцієнт політропи	m_T	$\lg\left(\frac{T_{2H}}{T_{1H}}\right) \cdot \left[\lg\left(\frac{P_{2H}}{P_{1H}}\right)\right]^{-1} = \frac{n_T - 1}{n_T}$ або $\frac{Z \cdot R}{C_p} \cdot \left(\frac{1}{\eta_\pi} + X\right)$	$\lg\left(\frac{T_{2H}}{T_{1H}}\right) \cdot \lg\left(\frac{P_{2H}}{P_{1H}}\right)^{-1}$ $\frac{K_0 - 1}{K_0} \cdot \frac{1}{\eta_\pi}$
Об'ємний коефіцієнт політропи	m_v	$\lg\left(\frac{Z_{2H} \cdot T_{2H}}{Z_{1H} \cdot T_{1H}}\right) \cdot \left[\lg\left(\frac{P_{2H}}{P_{1H}}\right)\right]^{-1}$ $1 - Y + m_T \cdot (1 + X)$	m_T m_T
Коефіцієнт «псевдоізоентропії»	$\frac{K - 1}{K}$	$\frac{Z \cdot R}{C_p - Z \cdot R \cdot X \cdot m_T^{-1}}$	$\frac{K_0 - 1}{K_0} = \frac{R}{C_{p_0}}$

Примечание [A1]:

3.1.2 Як еталон (корисну) роботу для ВЦН природного газу застосовують політропну роботу, в деяких випадках зустрічається використання ізоентропної (адіабатної) роботи.

3.1.3 Показники та характеристики ВЦН визначають за статичними параметрами компримованого газу (тиску і температурі), виміряних в перетинах вхідного і вихідного фланців (патрубків).

3.1.4 Об'ємну витрату на вході ВЦН обчислюють за такими формулами

$$Q_{1H} = \frac{G_H}{\rho_{1H}}; \quad (3.1)$$

$$\rho_{1H} = \frac{P_{1H} \cdot 10^3}{Z_{1H} \cdot R \cdot T_{1H}}; \quad (3.2)$$

$$Q_{1H} = 4,0 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{Z_{1H} \cdot T_{1H}}{P_{1H}} \cdot q_H. \quad (3.3)$$

Масова витрата і комерційна продуктивність ВЦН пов'язані формулою

$$G_H = 4,0 \cdot \frac{q_H}{R}. \quad (3.4)$$

3.1.5 Питому політропну роботу (політропний натиск) обчислюють за формулами

$$H_n = \frac{Z_{cp} \cdot R \cdot T_{1H}}{m_T} \cdot [(\epsilon_H)^{m_T} - 1] \cdot \xi; \quad (3.5)$$

$$Z_{cp} = \frac{Z_{1H} + Z_{2H}}{2}; \quad (3.6)$$

$$H_n = \frac{Z_{1H} \cdot R \cdot T_{1H}}{m_v} \cdot [(\epsilon_H)^{m_v} - 1] \cdot \xi, \quad (3.7)$$

де ξ – коригувальний коефіцієнт, що дорівнює 1,0 для $\epsilon_H \leq 4,0$.

3.1.6 Питому ізентропну роботу (ізентропний натиск) обчислюють за формулою

$$H_{из} = \frac{K_v}{K_v - 1} \cdot Z_{1H} \cdot R \cdot T_{1H} \cdot [(\epsilon_H)^{\frac{K_v - 1}{K_v}} - 1], \quad (3.8)$$

де K_v – показник ізентропного процесу.

3.1.7 Відповідно до ISO 5389 можуть бути використані два методи оцінки параметрів і ефективності процесу політропного стиснення:

- метод «таблиць і діаграм», який можна також назвати методом «ентальпій»;
- політропний метод Шульца.

Різниця результатів за цими методами не перевищує $\pm 0,1\%$.

При рівних можливостях застосування методів пріоритет віддається методу «ентальпій».

3.1.7.1 Метод «ентальпій»

– політропний ККД

$$\eta_n = \frac{H_n}{H_i} = \frac{H_n}{i_{2H} - i_{1H}}. \quad (3.9)$$

– внутрішня питома робота (повний напір)

$$H_i = i_{2H} - i_{1H}. \quad (3.10)$$

– внутрішня потужність, кВт

$$N_i = H_i \cdot G_n \quad (3.11)$$

3.1.7.2 Метод Шульца

– політропний ККД

$$\eta_n = \frac{Z_{cp} \cdot R}{m_T \cdot C_{p_{cp}} - R \cdot Z_{cp} \cdot X_{cp}} = \frac{K-1}{K} \cdot \frac{1}{m_T}, \quad (3.12)$$

– внутрішня питома робота (повний напір)

$$H_i = \frac{H_n}{\eta_n} = \frac{K}{K-1} \cdot Z_{cp} \cdot R \cdot (T_{2n} - T_{1n}), \quad (3.13)$$

– внутрішня потужність

$$N_i = \frac{K}{K-1} \cdot Z_{cp} \cdot R \cdot (T_{2n} - T_{1n}) \cdot G_n = 4,0 \cdot \frac{K}{K-1} \cdot Z_{cp} \cdot (T_{2n} - T_{1n}) \cdot q_n, \quad (3.14)$$

– середні параметри (Z_{cp} , $C_{p_{cp}}$, X_{cp}), що відображають властивості газів, обчислюють за формулами типу

$$Z_{cp} = \frac{Z_{1n} + Z_{2n}}{2}. \quad (3.15)$$

3.2 Властивості природних газів.

3.2.1 Як базове рівняння стану в даних методичних вказівках застосовано модифіковане (спрощене) рівняння стану «Бенедикта – Вебба – Рабіна» (BWR), подане в зведеній формі. На його основі визначено формули для розрахунку інших функцій стисливості (додаток В).

Базове рівняння стану

$$Z = 1 + \left(\frac{a_1}{\tau} - \frac{a_2}{\tau^2} - \frac{a_3}{\tau^4} \right) \frac{\pi}{Z} + \left(\frac{a_4}{\tau^2} - \frac{a_5}{\tau^3} + \frac{a_6}{\tau^5} \right) \frac{\pi^2}{Z^2}. \quad (3.16)$$

Для стандартного газу з компонентним складом по ДЕСТ 23194 (додаток В) значення коефіцієнтів дорівнюють:

$$\begin{aligned} a_1 &= 0,1237 & a_3 &= 0,1188 & a_5 &= 0,0273 \\ a_2 &= 0,3468 & a_4 &= 0,0291 & a_6 &= 0,0390. \end{aligned}$$

Коефіцієнти рівняння стану, отримані для газів, зазначених в таблиці В.1, зведені в таблицю В.2.

Для газів зі вмістом метану в діапазоні 95–100 % слід використовувати

коефіцієнти $a_1 \div a_6$, розраховані для стандартного складу, в діапазоні 90–95 % – для газу № 1, в діапазоні 85–90 % – для газу № 2 (додаток В).

зведені тиск і температура

$$\pi = \frac{P}{P_{кр}}, \quad (3.17)$$

$$\tau = \frac{T}{T_{кр}}; \quad (3.18)$$

середньокритичні (псевдокритичні) параметри газу визначаються за формулами

$$P_{кр} = 0,01 \cdot \sum_{i=1}^n P_{кр_i} \cdot x_i, \quad (3.19)$$

$$T_{кр} = 0,01 \cdot \sum_{i=1}^n T_{кр_i} \cdot x_i, \quad (3.20)$$

де $P_{кр_i}$, $T_{кр_i}$ - із таблиці Г.1.

З меншою точністю (щодо температури $\pm 0,5$ %, щодо тиску $\pm 0,3$ %) середньокритичні параметри можуть бути розраховані за наступними кореляційними рівняннями

$$P_{кр} = 4,67 - 0,1d. \quad (3.21)$$

$$T_{кр} = 99,8 + 162,8d.$$

3.2.2 Молярна маса природного газу

$$M = 0,01 \sum_{i=1}^n M_i \cdot x_i, \quad (3.22)$$

M_i - по таблиці Г.1.

Газова константа природного газу

$$R = \frac{8,31451}{M}. \quad (3.23)$$

Відносна щільність природного газу (за повітрям)

$$d = \frac{M}{28,96} \text{ або } d = \frac{0,287}{R}. \quad (3.24)$$

3.2.3 Мольну теплоємність $MC_{p_0} \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$ і мольну ентальпію $Mi_0 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$ природного газу в ідеально-газовому стані розраховують за формулами

$$MC_{p_0} = a + bT + cT^2 + dT^3, \quad (3.25)$$

$$Mi_0 = aT + \frac{b}{2}T^2 + \frac{c}{3}T^3 + \frac{d}{4}T^4, \quad (3.26)$$

де коефіцієнти a, b, c, d розраховують за формулою типу

$$a = 0,01 \cdot \sum_{i=1}^n a \cdot x_i, \quad (3.27)$$

Значення коефіцієнтів a_i, b_i, c_i, d_i компонентів природних газів зведені в таблицю Д1 додатку Д.

Питому теплоємність і питому ентальпію газу в ідеально-газовому стані визначають за формулами

$$C_{p_0} = \frac{MC_{p_0}}{M}, \quad (3.28)$$

$$i_0 = \frac{Mi_0}{M}. \quad (3.29)$$

Допускається розрахунок мольної теплоємності MC_{p_0} у діапазоні температур $268 \text{ K} < t_{cp} < 350 \text{ K}$ за кореляційною формулою

$$MC_{p_0} = 21,6 + (23,7 + 0,071 \cdot t_{cp}) \cdot d, \quad (3.30)$$

$$t_{cp} = \frac{t_{1n} + t_{2n}}{2}. \quad (3.31)$$

Імовірна похибка розрахунку $\pm 1 \%$.

3.2.4 Діапазон застосування даних (пункти 3.2.1 ÷ 3.2.3) для розрахунку властивостей природних газів:

$\text{CH}_4 > 85 \%$; $260 \text{ K} < T < 400 \text{ K}$; $P < 15 \text{ МПа}$.

У цьому діапазоні параметрів ймовірна похибка розрахунку напору, ККД і потужності, пов'язана з неточністю термодинамічних даних $\leq 0,5 \%$.

3.3 Характеристики газового компресора (ВЦН).

3.3.1 При обробці результатів випробувань використовують такі зведені розмірні показники:

зведена об'ємна витрата на вході

$$Q_{1np} = Q_{1n} \cdot \frac{n_{H_0}}{n_n}, \quad (3.32)$$

зведений політропний натиск

$$H_{nnp} = H_n \cdot \left(\frac{n_{H_0}}{n_n}\right)^2, \quad (3.33)$$

зведений повний напір (різниця ентальпій)

$$H_{i_{np}} = H_i \cdot \left(\frac{n_{n_0}}{n_n}\right)^2, \quad (3.34)$$

зведений політропний ККД

$$\eta_{n_{np}} = \eta_n, \quad (3.35)$$

зведена питома потужність

$$\left(\frac{N_i}{\rho_{1n}}\right)_{np} = \left(\frac{N_i}{\rho_{1n}}\right) \cdot \left(\frac{n_{n_0}}{n_n}\right)^3, \quad (3.36)$$

зведена ступінь підвищення тиску (ступінь стиснення)

$$\varepsilon_{H_{np}} = \left[\frac{m_{v_0} \cdot H_{n_{np}}}{(Z_{1n} \cdot R \cdot T_{1n})_0} + 1 \right]^{\frac{1}{m_{v_0}}}, \quad (3.37)$$

Показник m_{v_0} визначають за формулами таблиці 3.1 для зведених (специфікаційних, номінальних) умов і параметрів. У першому розрахунковому наближенні показники «середніх» параметрів («ср») можуть бути замінені показниками параметрів входу («1 н»). Для наближених розрахунків можна прийняти $m_{v_0} = 0,3$. Для природних газів в діапазоні параметрів, характерних для магістральних газопроводів похибка становитиме не більше $\pm 0,2\%$.

3.3.2 Для порівняння з заданими параметрами газодинамічні характеристики зазвичай надають у вигляді таких графічних функцій:

$$H_{n_{np}}, \eta_n, H_{i_{np}}, \left(\frac{N_i}{\rho_{1n}}\right)_{np} = f(Q_{1n_{np}}), \quad (3.38)$$

або

$$H_{n_{np}}, \eta_n, \left(\frac{N_i}{\rho_{1n}}\right)_{np}, Q_{1n_{np}} = f(H_{i_{np}}), \quad (3.39)$$

У додатку Ж наведено приклад розрахунку показників ВЦН за результатами газодинамічних випробувань на природному газі.

У додатку І наведено приклад розрахунку показників ГПА за результатами випробувань, виконаних в обсязі типової схеми вимірювань (рисунк Е.1).

ДОДАТОК А

Характеристика компонентів природного газу

Таблиця А.1 – Об’ємна нижча теплота згорання і відносна щільність компонентів сухого природного газу для 20° С та тиску 101,325 кПа

Назва компоненту	Формула	Об’ємна нижча теплота згорання		Відносна щільність за повітрям
		$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$	$\frac{\text{ккал}}{\text{м}^3}$	
Метан	CH ₄	33431	7985	0,5548
Етан	C ₂ H ₆	59869	14300	1,0462
Пропан	C ₃ H ₈	86374	20630	1,5477
н-Бутан	н-C ₄ H ₁₀	114098	27252	2,0720
і-Бутан	і-C ₄ H ₁₀	113378	27080	2,0657
Пентани	C ₅ H ₁₂	143170	34196	2,6240
Гексани	C ₆ H ₁₄	175832	41997	3,2363
Гептани	C ₇ H ₁₆	213619	51023	3,9479
Октани	C ₈ H ₁₈	260343	62183	4,8254
Нонани	C ₉ H ₂₀	324150	77423	4,4100
Бензол	C ₆ H ₆	140769	33623	2,8802
Толуол	C ₇ H ₈	175785	41986	3,5651
Водень	H ₂	10044	2399	0,0695
Окис вуглецю	CO	11765	2810	0,9672
Сірководень	H ₂ S	21747	5194	1,1882
Двоокис вуглецю	CO ₂	–	–	1,5271
Азот	N ₂	–	–	0,9672
Кисень	O ₂	–	–	1,1052
Гелій	He	–	–	0,1381

Дані таблиці наведено дані для розрахунку коефіцієнта стисливості Z.

ДОДАТОК Б

Функції стисливості на підставах зведеного рівняння стану BWR

$$Z^3 - Z^2 - Z\left(\frac{a_1}{\tau} - \frac{a_2}{\tau^2} - \frac{a_3}{\tau^4}\right)\pi - \left(\frac{a_4}{\tau^2} - \frac{a_5}{\tau^3} + \frac{a_6}{\tau^5}\right)\pi^2 = 0;$$

$$\frac{1}{Y} = 1 + \frac{1}{Z} \left[Z - 1 + \left(a_4 - \frac{a_5}{\tau} + \frac{a_6}{\tau^3}\right) \cdot \frac{\pi^2}{\tau^2 Z^2} \right];$$

$$X = \frac{Y}{Z} \left[\left(\frac{a_2}{\tau} + \frac{3a_3}{\tau^3}\right) \cdot \frac{\pi}{Z\tau} + \left(\frac{a_5}{\tau} - \frac{3a_6}{\tau^3}\right) \cdot \frac{\pi^2}{Z^2 \tau^2} + Z \right] - 1;$$

$$\frac{\Delta C_p}{R} = \frac{Z(1+X)^2}{Y} + \frac{6a_3\pi}{Z\tau^4} - \frac{3a_6\pi^2}{Z^2\tau^5} - 1;$$

$$-\frac{\Delta i}{RT_{кр}} = \tau \left[\left(\frac{a_2}{\tau} + \frac{3a_3}{\tau^3}\right) \cdot \frac{\pi}{Z\tau} + 0,5\left(\frac{a_5}{\tau} - \frac{3a_6}{\tau^3}\right) \cdot \frac{\pi^2}{Z^2\tau^2} + 1 - Z \right].$$

ДОДАТОК В

Стандартні природні гази

Таблиця В.1 – Склад в об'ємних відсотках газу

Назва газу	за ДЕСТ 23194	№ 1	№ 2
Метан CH ₄	98,63	93,30	85,95
Етан C ₂ H ₆	0,12	4,00	5,85
Пропан C ₃ H ₈	0,02	0,60	2,07
н-Бутан н-C ₄ H ₁₀	0,10	0,40	0,74
н-Пентан н-C ₅ H ₁₂ + вищі	–	0,30	0,36
Диоксид вуглецю CO ₂	1,01	0,10	2,19
Азот N ₂	0,12	1,30	2,84

Таблиця В.2 – Значення коефіцієнтів рівняння стану

Газ	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆
Метан	0,1248	0,3475	0,1164	0,0290	0,0271	0,0385
за ДЕСТ 23194	0,1237	0,3468	0,1188	0,0291	0,0273	0,0390
№ 1	0,1251	0,3446	0,1314	0,0297	0,0292	0,0428
№ 2	0,1235	0,3417	0,1443	0,0303	0,0312	0,0464

ДОДАТОК Г

Фізичні константи індивідуальних газів

Таблиця Г.1 – Фізичні константи газів при 293,15 К і 0,101325 Мпа

Назва газу	Молярна маса M_i , кг/кмоль	Газова константа, R_i , кДж/кг·К	Критичний тиск, $P_{кр_i}$, МПа	Критична температура $T_{кр_i}$, К
Метан	16,043	0,51826	4,600	190,56
Етан	30,070	0,27651	4,880	305,83
Пропан	44,097	0,18855	4,250	369,82
н-Бутан	58,123	0,14305	3,784	425,14
ізо-Бутан	58,123	0,14305	3,648	408,13
н-Пентан	72,150	0,11524	3,364	469,69
ізо-Пентан	72,150	0,11524	3,381	460,39
Гексан	86,177	0,09648	3,030	506,40
Гептан	100,204	0,08298	2,740	539,20
Азот	28,014	0,29670	3,390	126,20
Вуглекислий газ	44,010	0,18892	7,386	304,20
Повітря	28,963	0,28707	3,751	132,42
Кисень	31,999	0,25984	5,043	154,58
Сірководень	34,082	0,24396	8,940	373,20
Водень	2,016	4,12426	1,297	33,20
Водяна пара	18,015	0,46153	22,064	647,14
Природ. газ ДЕСТ 23194	16,404	0,50686	4,636	192,137

ДОДАТОК Д

Коефіцієнти компонентів природного газу

Таблиця Д.1 – Значення коефіцієнтів індивідуальних газів для розрахунку мольної теплоємності в ідеальному газовому стані

Назва газу	Фор- мула	a_i , кДж кмоль·К	$b_i \cdot 10^2$, кДж кмоль·К ²	$c_i \cdot 10^4$, кДж кмоль·К ³	$d_i \cdot 10^6$, кДж кмоль·К ⁴
Метан	CH ₄	41,205	-9,4802	3,2343	-0,2240
Етан	C ₂ H ₆	36,790	- 4,7361	4,4853	- 0,3770
Пропан	C ₃ H ₈	43,467	- 5,4240	7,2168	- 0,6728
н-Бутан	н-C ₄ H ₁₂	45,126	6,1094	5,5504	- 0,5257
н-Пентан	н-C ₅ H ₁₂	55,301	8,3569	6,6775	- 0,6402
н-Гексан	н-C ₆ H ₁₄	90,192	- 6,9857	11,8730	- 0,0106
Азот	N ₂	29,040	0,1151	- 0,0682	0,0133
Вуглекислий газ	CO ₂	20,810	6,3606	- 0,2914	- 0,0063
Природний газ ДЕСТ 23194	—	40,983	- 9,2866	3,1993	- 0,2221

ДОДАТОК Е

Схеми і параметри циклів ГТД

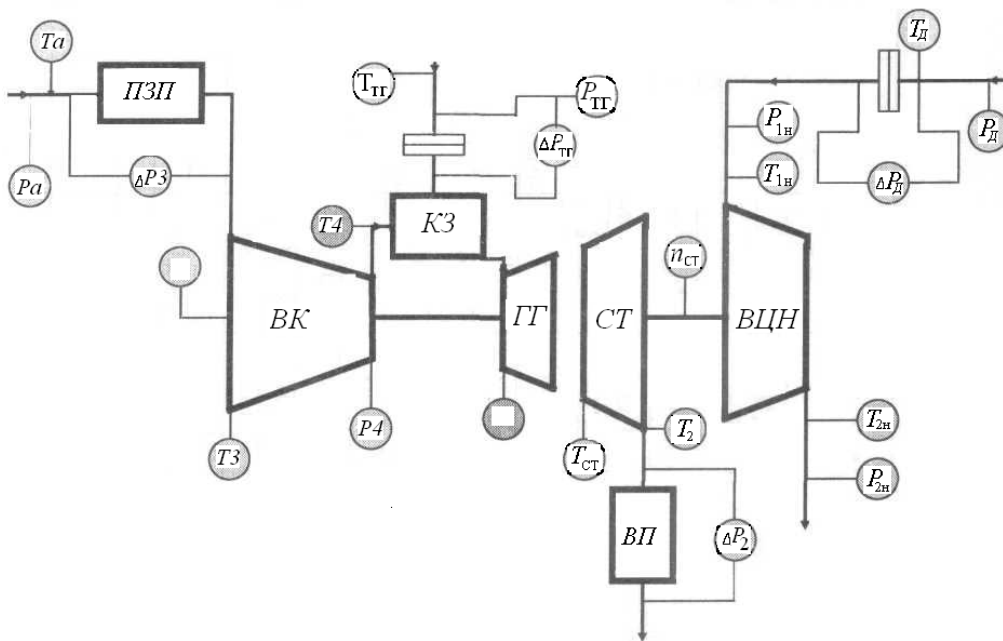


Рисунок Е.1 – Принципова схема вимірювань в однокаскадному ГТД з ВЦН у складі ГПА: ПЗП – повітрянозабірний пристрій, ГГ – газогенератор, БК – вісний компресор, СТ – силова турбіна, КЗ – камера згоряння, ВП – вихлопний пристрій, ВЦН – відцентровий нагнітач.

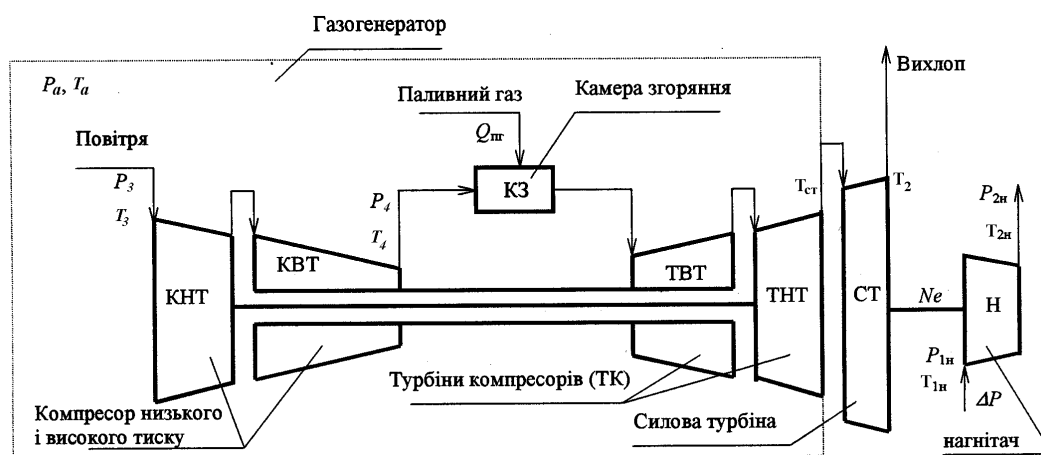


Рисунок Е.2 – Принципова схема вимірювання в двокаскадному ГТД з ВЦН у складі ГПА

ДОДАТОК Ж

Приклад розрахунку показників ВЦН

Таблиця Ж.1 – Початкові дані для розрахунку показників ВПЦ за результатами газодинамічних випробувань на природному газі та основні результати розрахунків

Найменування величини	Позначення	Одиниці вимірювань	Формула, джерело, пункт	Варіанти	
				I	II
Склад природного газу			Хроматографічний аналіз проби		
Метан	CH ₄	%		98,630	92,880
Етан	C ₂ H ₆	%		0,120	3,740
Пропан	C ₃ H ₈	%		0,020	1,340
i-Бутан	i-C ₄ H ₁₀	%		0,000	0,000
n-Бутан	n-C ₄ H ₁₀	%		0,100	0,370
i-Пентан	i-C ₅ H ₁₂	%		0,000	0,000
n-Пентан	n-C ₅ H ₁₂	%		0,000	0,270
Диоксид вуглецю	CO ₂	%		1,010	0,400
Азот	N ₂	%		0,120	1,000
Тиск газу на вході	$P_{1н}$	МПа	Вимірювання	5,099	6,492
Тиск газу на виході	$P_{2н}$	МПа	Вимірювання	7,423	9,276
Температура газу на вході	$T_{1н}$	К	Вимірювання	276,5	266,6
Температура газу на виході	$T_{2н}$	К	Вимірювання	308,2	296,1
Продуктивність ВЦН	q_n	м ³ /доба × 10 ⁶	Вимірювання	25,3	31,2
Частота обертів ВЦН	n_n	об/хв	Вимірювання	5100	5000
Молярна маса	M	кг/кмоль	3.22	16,404	17,482
Критичний тиск	$P_{кр}$	МПа	3.19	4,640	4,610
Критична температура	$T_{кр}$	К	3.20	192,14	198,78
Газова константа	R	кДж/(кг·К)	3.23	0,507	0,476
Ступінь стиснення	ε_n	—	$\frac{P_{2н}}{P_{1н}}$	1,456	1,429
Зведений тиск на вході	$\pi_{1н}$	—	3.17	1,100	1,409
Зведений тиск на виході	$\pi_{2н}$	—	3.17	1,601	2,013

Продовження табл. Ж 1

Зведена температура на вході	τ_{1n}	—	3.18	1,439	1,341
Зведена температура на виході	τ_{2n}	—	3.18	1,604	1,490
Коефіцієнт стисливості на вході	Z_{1n}	—	3.16	0,881	0,800
Коефіцієнт стисливості на виході	Z_{2n}	—	3.16	0,891	0,822
Розрахунок напору і ККД за методом Шульца					
Середній коефіцієнт стисливості	Z_{cp}	—	3.15	0,886	0,811
Коефіцієнт ізотермічної стисливості на вході	Y_{1n}	—	Додаток Б	1,130	1,242
Коефіцієнт ізотерм. стисливості на виході	Y_{2n}	—	Додаток Б	1,101	1,163
Середній коефіцієнт ізотер. стисливості	Y_{cp}	—	$\frac{Y_{1n} + Y_{2n}}{2}$	1,115	1,203
Коефіцієнт ізобаричної стисливості на вході	X_{1n}	—	Додаток Б	0,511	1,017
Коефіцієнт ізобар. стисливості на виході	X_{2n}	—	Додаток Б	0,502	0,905
Середній коефіцієнт ізобар. стисливості	X_{cp}	—	$\frac{X_{1n} + X_{2n}}{2}$	0,507	0,961
Теплоємність в ідеальному стані на вході	$C_{p_{01}}$	кДж/кг	3.28 та 3.25	2,138	2,060
Поправка теплоємності на вході	ΔC_{p_1}	кДж/кг	Додаток Б	0,486	0,930
Теплоємність на вході	$C_{p_{1n}}$	кДж/кг	$C_{p_{01}} + \Delta C_{p_1}$	2,624	2,990
Теплоємність в ідеальному стані на виході	$C_{p_{02}}$	кДж/кг	3.28 та 3.25	2,210	2,128
Поправка теплоємності на виході	ΔC_{p_2}	кДж/кг	Додаток Б	0,499	0,881
Теплоємність на виході	$C_{p_{2n}}$	кДж/кг	$C_{p_{02}} + \Delta C_{p_2}$	2,709	3,009
Середня теплоємність	$C_{p_{cp}}$	кДж/кг	$\frac{C_{p_{1n}} + C_{p_{2n}}}{2}$	2,667	3,000

Продовження табл. Ж 1

Температурний показник політропи	m_T	—	$\lg\left(\frac{T_{2n}}{T_{1n}}\right) \cdot [\lg(\epsilon_n)]^{-1}$	0,289	0,294
Показник псевдоізоентропи	$\frac{K}{K-1}$	—	$\frac{C_{p_{cp}}}{Z_{cp} \cdot R} - \frac{X_{cp}}{m_T}$	4,184	4,504
Політропний ККД	η_n	—	3.12	0,827	0,754
Повний напір	H_i	кДж/кг	3.13	59,560	51,316
Політропний напір	H_n	кДж/кг	3.5; 3.6; 3.7	49,267	38,689
Розрахунок напору і ККД за методом «ентальпій»					
Ентальпія на вході при ідеальному стані	$i_{0_{1n}}$	кДж/кг	3.29 та 3.23	592,030	543,858
Поправка ентальпії на вході	Δi_{1n}	кДж/кг	Додаток Б	-59,435	-92,069
Ентальпія на вході	i_{1n}	кДж/кг	$i_{0_{1n}} + \Delta i_{1n}$	533,147	455,336
Ентальпія на виході при ідеальному стані	$i_{0_{2n}}$	кДж/кг	3.29 та 3.23	660,900	605,601
Поправка ентальпії на виході	Δi_{2n}	кДж/кг	Додаток Б	-68,862	-102,564
Ентальпія на виході	i_{2n}	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$i_{0_{2n}} + \Delta i_{2n}$	592,039	503,037
Повний напір	H_i	кДж/кг	$i_{2n} - i_{1n}$	59,444	51,247
Об'ємний показник політропи	m_v	—	$\lg\left(\frac{Z_{2n} \cdot T_{2n}}{Z_{1n} \cdot T_{1n}}\right) \cdot [\lg(\epsilon_n)]^{-1}$	0,319	0,373
Політропний напір	H_n	кДж/кг	3.7 (або 3.5; 3.6)	49,271	38,696
Політропний ККД	η_n	кДж/кг	$\frac{H_n}{H_i}$	0,829	0,755
Розрахунок зведених показників					
$(Z_{1n_0} = 0,9; R_0 = 0,490 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; T_{1n_0} = 288 \text{ К}; n_0 = 5300 \frac{\text{об}}{\text{мин}})$					
Щільність на вході	ρ_{1n}	кг/м ³	3.2	41,24	63,71
Масова витрата на вході	G_n	кг/с	3.4	199,61	262,18
Об'ємна витрата на вході	Q_{1n}	м ³ /хв	$60 \cdot G_n / \rho_{1n}$	290,41	246,91
Внутрішня потужність	N_i	кВт	3.11	11865	13436

Продовження табл. Ж 1

Питома потужність	$\frac{Ni}{\rho_{1H}}$	кВт·м ³ /кг	$\frac{Ni}{\rho_{1H}}$	287,7	210,9
Зведена об'ємна витрата	$Q_{1H_{np}}$	м ³ /с	3.32	304,80	261,72
Зведений політропний напір	$H_{n_{np}}$	кДж/кг	3.33	53,21	43,48
Зведений повний напір	$H_{i_{np}}$	кДж/кг	3.34	64,20	57,58
Зведена ступінь підвищення тиску	ε_{np}	—	3.37	1,484	1,386
Зведена питома потужність	$(\frac{N_i}{\rho_{1H}})_{np}$	кВт·м ³ /кг	3.36	322,9	251,2

ДОДАТОК К

Приклад розрахунку показників ГПА

Компонентний склад паливного та перекачуваного газу, визначений хроматографічним методом (в % об.): CH_4 – 98,789; C_2H_6 – 0,266; C_3H_8 – 0,082; $\text{n-C}_4\text{H}_{10}$ – 0,014; $\text{i-C}_4\text{H}_{10}$ – 0,015; $\text{n-C}_3\text{H}_{12}$ – 0,002; $\text{i-C}_5\text{H}_{12}$ – 0,003; N_2 – 0,804; CO_2 – 0,023.

Таблиця К.1 – Константи паливного і перекачуваного газу

Константи	Позначення	Одиниці вимірювань	Формула	Значення параметра
Критичний тиск	$P_{\text{кр}}$	МПа	3.19	4,59
Критична температура	$T_{\text{кр}}$	К	3.20	190,60
Молярна маса	M	кг/кмоль	3.22	16,22
Газова константа	R	кДж/кг·К	3.23	0,5126
Масова нижча теплота згоряння	$Q_{\text{м}}$	кДж/кг	2.5	49280

Таблиця К.2 – Розрахунок показників ГПА

Найменування параметра	Позначення	Одиниці вимірювань	Формула, джерело, пункт	Значення параметра
Вимірювані параметри				
Барометричний тиск	P_a	МПа	Вимірювання	0,09919
Температура атмосферного повітря	T_a	К	Вимірювання	289,6
Температура на вході компресора	T_3	К	Вимірювання	290,0
Втрати тиску вхідного тракту	ΔP_3	кПа	Вимірювання	0,520
Частота обертання ротора компресора НТ	$n_{\text{кнт}}$	об/хв	Вимірювання	6957

Продовження табл. К 2

Частота обертання ротора ВТ	$n_{\text{квт}}$	об/хв	Вимірювання	8996
Температура за компресором	T_4	К	Вимірювання	–
Абсолютний тиск після компресора	P_4	МПа	Вимірювання	1,669
Частота обертання ротора силової турбіни	$n_{\text{ст}}$	об/хв	Вимірювання	5102
Температура перед силовою турбіною	$T_{\text{ст}}$	К	Вимірювання	898,2
Температура після турбіни	T_2	К	Вимірювання	–
Втрати тиску у вихлопному тракті	ΔP_2	кПа	Вимірювання	0,300
Абсолютний тиск паливного газу	$P_{\text{пг}}$	МПа	Вимірювання	2,452
Температура паливного газу	$T_{\text{пг}}$	К	Вимірювання	288,8
Перепад тиску на пристрої звуження потоку	$\Delta P_{\text{пг}}$	кПа	Вимірювання	2,715
Абсолютний тиск газу на вході нагнітача	$P_{1\text{н}}$	МПа	Вимірювання	5,079
Абсолютний тиск на виході нагнітача	$P_{2\text{н}}$	МПа	Вимірювання	6,785
Температура газу на вході нагнітача	$T_{1\text{н}}$	К	Вимірювання	317,3

Продовження табл. К 2

Температура газу на виході нагнітача	$T_{2н}$	К	Вимірювання	347,6
Абсолютний тиск компримованого газу на вході в звуження потоку	P_d	МПа	Вимірювання	5,079
Температура компримованого газу на вході в звуження потоку	T_d	К	Вимірювання	317,3
Перепад тисків на пристрої звуження потоку	ΔP_d	кПа	Вимірювання	2,368
Розрахунок параметрів ВЦН				
Зведений тиск на вході в звуження потоку	π_d	—		1,097
Зведена температура на вході в звуження потоку	τ_d	—	$\frac{T_d}{T_{кр}}$	1,663
Коефіцієнт стисливості на вході в звуження потоку	Z_d	—	6.2.1	0,933
Щільність газу на вході в звуження потоку	ρ_d	кг/м ³	$\frac{P_d \cdot 10^3}{Z_d \cdot R \cdot T_d}$	33,46

Продовження табл. К 2

Масова витрата через ВЦН	$G_{1н}$	кг/с	$22,65 \cdot \sqrt{\Delta P_{д} \cdot \rho_{д}}$	201,61
Зведений тиск на вході в ВЦН	π_1	—	$\frac{P_{1н}}{P_{кр}}$	1,097
Зведена температура на вході в ВЦН	τ_1	—	$\frac{T_{1н}}{P_{кр}}$	1,665
Зведений тиск на виході ВЦН	π_2	—	$\frac{P_{2н}}{P_{кр}}$	1,465
Зведена температура на виході ВЦН	τ_2	—	$\frac{T_{2н}}{T_{кр}}$	1,824
Коефіцієнт стисливості на вході	$Z_{1н}$	—	3.16	0,933
Коефіцієнт стисливості на виході	$Z_{2н}$	—	3.16	0,942
Щільність газу на вході ВЦН	$\rho_{1н}$	—	$\frac{P_{1н} \cdot 10^3}{Z_{1н} \cdot R \cdot T_{1н}}$	33,44
Ентальпія в ідеальному стані на вході ВЦН	i_{0_1}	кДж/кг	3.26 та 3.29	689,00
Поправка ентальпії на вході ВЦН	Δi_1	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Додаток Б	– 43,78
Ентальпія в ідеальному стані на виході ВЦН	i_{0_2}	кДж/кг	3.26 та 3.29	758,6
Поправка ентальпії на виході ВЦН	Δi_2	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Додаток Б	– 48,37

Продовження табл. К 2

Ентальпія на вході ВЦН	$i_{1н}$	кДж/кг	$i_{0_1} + \Delta i_1$	645,22
Ентальпія на виході ВЦН	$i_{2н}$	кДж/кг	$i_{0_2} + \Delta i_2$	710,66
Повний напір	H_i	кДж/кг	$i_{2н} - i_{1н}$	65,00
Об'ємний показник політропи	m_v	—	$(\lg \frac{T_2 \cdot Z_2}{T_1 \cdot Z_1}) \cdot (\lg \varepsilon_n)^{-1}$	0,348
Політропний натиск	H_n	кДж/кг	$\frac{Z_{1н} \cdot R \cdot T_{1н}}{m_v} \cdot (\varepsilon_n^{m_v} - 1)$	46,20
Політропний ККД	η_n	—	$\frac{H_n}{H_i}$	0,711
Внутрішня потужність нагнітача	N_i	кВт	$H_i \cdot G_n$	13112
Механічні втрати в нагнітачі	N_m	кВт	$0,01 \cdot N_i$	131
Відносна внутрішня потужність нагнітача	$\frac{N_i}{\rho_{1н}}$	$\frac{\text{кВт} \cdot \text{м}^3}{\text{кг}}$	$\frac{N_i}{\rho_{1н}}$	392,1
Об'ємна витрата крізь ВЦН	$Q_{1н}$	м ³ /хв	$\frac{60 \cdot G_{1н}}{\rho_{1н}}$	361,75
Розрахунок зведених показників ВЦН $(Z_{1н_0} = 0,9; R_0 = 0,490 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; T_{1н_0} = 288 \text{ К}; n_0 = 5200 \frac{\text{об}}{\text{мин}})$				
Зведена витрата крізь нагнітач	$Q_{1н_{np}}$	м ³ /хв	$Q_{1н} \cdot \frac{n_0}{n_{ст}}$	368,6
Зведений політропний напір	$H_{n_{np}}$	кДж/кг	$H_p \cdot (\frac{n_0}{n_{ст}})^2$	48,01
Зведений повний напір	$H_{i_{np}}$	кДж/кг	$H_i \cdot (\frac{n_0}{n_{ст}})^2$	67,56

Продовження табл. К 2

Зведена відносна внутрішня потужність	$(\frac{N_i}{\rho_{1H}})_{np}$	$\frac{\text{кВт} \cdot \text{м}^3}{\text{кг}}$	$(\frac{N_i}{\rho_{1H}}) \cdot (\frac{n_0}{n_{ct}})^3$	415,1
Зведена ступінь стиснення	ε_{np}	—	$(\frac{m_{v_0} \cdot H_{n_{np}}}{Z_{1H_0} \cdot R_0 \cdot T_{1H_0}} + 1)^{\frac{1}{m_{v_0}}}$	1,418
Розрахунок показників ГТУ				
Тиск перед компресором	P_3	МПа	$P_a - 0,6 \cdot \Delta P_3$	0,0989
Ступінь підвищення тиску компресора	ε_k	—	$\frac{P_4}{P_3}$	16,88
Відносні втрати вхідного тракту	$\delta \bar{P}_3$	%	$(\frac{P_a - P_3}{P_a}) \cdot 100$	0,312
Відносні втрати вихлопного тракту	$\delta \bar{P}_2$	%	$(\frac{P_2 - P_a}{P_2}) \cdot 100$	0,301
Ефективна потужність ГТУ	N_e	кВт	$N_i + N_m$	13243
Коефіцієнт стисливості паливного газу	$Z_{пг}$	-	3.16	0,952
Щільність паливного газу на вході в звужуючий пристрій	$\rho_{пг}$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\frac{P_{пг}}{Z_{пг} \cdot R \cdot T_{пг}} \cdot 10^3$	17,39
Витрата паливного газу	$G_{пг}$	кг/с	$0,134 \sqrt{\rho_{пг} \cdot \Delta P_{пг}}$	0,86
Ефективний ККД ГТУ	η_e	%	$\frac{N_e}{G_{пг} \cdot Q_m} \cdot 10^2$	30,85

Продовження табл. К 2

Зведені показники ГТУ у станційних умовах ($P_{a_0} = 0,1013 \text{ МПа}$; $T_{a_0} = 288 \text{ К}$; $Q_{m_0} = 50000 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$)				
Зведена потужність	$N_{e_{np}}$	кВт	$\frac{P_{a_0}}{P_a} \cdot \sqrt{\frac{T_{a_0}}{T_3}} \cdot N_e$	13478
Зведена витрата паливного газу	$G_{\text{тг}_{np}}$	кг/с	$\frac{P_{a_0}}{P_a} \cdot \sqrt{\frac{T_{a_0}}{T_3}} \cdot G_{\text{тг}} \cdot \frac{Q_{\text{тг}}}{Q_{\text{тг}_0}}$	0,874
Зведена температура перед силовою турбіною	$T_{\text{ст}_{np}}$	К	$\frac{T_{\text{ст}}}{T_3} \cdot T_{a_0}$	879,6
Зведена температура після турбіни	$T_{2_{np}}$	К	$\frac{T_2}{T_3} \cdot T_{a_0}$	—
Зведена частота обертання ротора КНТ	$n_{\text{кнд}_{np}}$	об/хв	$n_{\text{кнд}} \cdot \sqrt{\frac{T_{a_0}}{T_3}}$	6933
Зведена частота обертання ротора КВТ	$n_{\text{квд}_{np}}$	об/хв	$n_{\text{квд}} \cdot \sqrt{\frac{T_{a_0}}{T_3}}$	8965
Зведена частота обертання ротора си-лової турбіни	$n_{\text{ст}_{np}}$	об/хв	$n_{\text{ст}} \cdot \sqrt{\frac{T_{a_0}}{T_3}}$	5084
Зведений ККД ГТУ	$\eta_{e_{np}}$	%	η_e	30,85

Зведені параметри ГТУ за умов ІСО 2314 (ДЕСТ 20440)				
Потужність ГТУ	$N_{e \text{ ІСО}}$	кВт	$\left(1 + \frac{1,43 \delta \bar{P}_3 + 0,92 \delta \bar{P}_2}{100}\right) N_{e \text{ пр}}$	13577
ККД ГТУ	$\eta_{e \text{ ІСО}}$	%	$\left(1 + \frac{0,74 \delta \bar{P}_3 + 0,74 \delta \bar{P}_2}{100}\right) \eta_e$	31,0

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до розрахункової роботи

«Опрацювання результатів випробувань газотурбінних
газоперекачувальних агрегатів»

з курсу «Змінні режими газотурбінних установок»
для студентів спеціальності 142 Енергетичне машинобудування

Укладачі: ЛАПУЗІН Олександр Вікторович

ЮДІН Юрій Олексійович

СУБОТОВИЧ Валерій Петрович

Відповідальний за випуск проф. Усатий О.П.

Роботу до друку рекомендував проф. Ромашов Ю.В.

Редактор М.П. Єфремова

План 2020 р., поз. 86 _____

Підписано до друку _____. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.

Riso-друк. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 1,4.

Наклад 50 прим. Зам. №_____Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №5478 від 21.08.2017 р.
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

Самостійне електронне видання